

**Николай БЕЛАШ<sup>1</sup>, Игорь ЧЕРНОВ<sup>1</sup>, Валерий ЗУЕК<sup>1</sup>, Владимир ЗИГУНОВ<sup>1</sup>,  
Елена БЕРЕЗНЯК<sup>2</sup>, Игорь КОЛОДИЙ<sup>2</sup>**

## **КОРРОЗИОННАЯ СТОЙКОСТЬ ГАФНАТА ДИСПРОЗИЯ В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ РЕАКТОРА ВВЭР-1000**

<sup>1</sup>*Научно-технический комплекс «Ядерный топливный цикл»  
<sup>2</sup>Институт физики твердого тела, материаловедения и технологий  
Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт»  
ул. Академическая 1, г. Харьков. E-mail: belash@kipt.kharkov.ua*

**Mykola BELASH<sup>1</sup>, Igor CHERNOV<sup>1</sup>, Valeriy ZUYOK<sup>1</sup>, Volodymyr ZIGUNOV<sup>1</sup>,  
Olena BEREZNYAK<sup>2</sup>, Igor KOLODIY<sup>2</sup>**

## **CORROSION RESISTANCE OF DYSPROSIUM HAFNATE IN WWER-1000 REACTOR COOLANT**

<sup>1</sup>*Scientific and Technological Department «Nuclear Fuel Cycle»  
<sup>2</sup>Institute of Solid State, Material Science and Technology,  
National Science Center «Kharkiv Institute of Physics and Technology»,  
1, Academichna Str., Kharkiv, Ukraine. E-mail: belash@kipt.kharkov.ua*

### **ABSTRACT**

The problem of low corrosion resistance of the rare-earth metal oxides with a large neutron absorption cross-section is achieved by preparing of the compositions in their compound's form, such as titanates and hafnates. Dysprosium hafnate based absorbers are currently considered to be the most promising materials for usage in control rods of nuclear power reactors. One of the most important requirements for the absorber elements performance is a high corrosion resistance of used absorber materials.

The aim of this work is to study the corrosion resistance of dysprosium hafnate (in pellets and powder form) during the long-term autoclave tests in water composition of the primary circuit of the WWER-1000 reactor.

Investigation of the dysprosium hafnate interaction with a water coolant was performed using the pellets and powder form. Pellets were prepared from the initial oxides powder Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-36.1%wt HfO<sub>2</sub> using the next scheme: pellets forming, preliminary sintering, grinding the pellets into a powder and final sintering. Sintering operations were performed in a high temperature furnace VP 04/17 in air atmosphere. For investigations three pellet series were prepared, which were differed each other on sintering mode, phase composition and density.

Corrosion tests of dysprosium hafnate pellets (and powder, made from these pellets) were carried out in the conventional autoclave and as a part of the absorber elements faulty mock-ups. Phase composition of the samples was studied by X-ray diffraction (diffractometer DRON-2.0) and by infrared spectroscopy (IR-spectrophotometer UR-20 Zeiss). Crystal-optical investigations were carried out on POLAM-L211 and MIN-8 microscopes.

It is shown that the series 1 samples are fully consists of dysprosium hafnate Dy<sub>2</sub>Hf<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-f (fluorite type structure, lattice parameter  $a = 5.257 \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ ). Series 2 and 3 samples are multiphase. The main phase is Dy<sub>2</sub>Hf<sub>2</sub>O<sub>7</sub>-f (its content is 93...95% wt). Besides, the next phases were revealed: dysprosium oxide Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (3.5...4.3% wt) and cubic hafnium oxide HfO<sub>2</sub> (1.8...2.1% wt). It should be noted, that weak absorption bands of molecular water were revealed in samples of all series.

Tests of dysprosium hafnate pellets in WWER-1000 reactor coolant medium at 350°C and a pressure of 16.5 MPa showed that, practically, there were no weight change of high-density samples (porosity is <5%) during 7200 h. The corrosion process of series 2 and 3 samples (which had small amounts of Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and HfO<sub>2</sub> and porosity 6.5...7.5% and 14...16%, respectively) can be divided into two stages: initial and established. At the initial stage (test duration up to ~1300 h) the corrosion process is more intense than at the established stage. Average corrosion rates of these two series samples at the initial stage are equal to 18.5 mg/m<sup>2</sup>·h and 36.2 mg/m<sup>2</sup>·h, respectively. At the established stage these values decrease to 11.3 mg/m<sup>2</sup>·h and 8.3 mg/m<sup>2</sup>·h. This corrosion behavior can be explained by the fact that at the initial stage intensive process of filling the open pores by coolant takes place. Coolant interacts with the pellet's material forming, probably, dysprosium and hafnium hydroxides and dysprosium borate. Overweight of samples as a result of hydration process confirmed by the IR

spectroscopy studies. Bands of stretching and deformation vibrations of hydroxyl group OH (3530 and 1610  $\text{cm}^{-1}$ ) were fixed in the samples after the corrosion test.

As the result of autoclave tests of faulty mock-ups during 5200 h dysprosium hafnate powder sintered in a rod which diameter equal to the inner diameter of the shells. Weight cores increased by ~3% compared to the original dysprosium hafnate powder. The strength of samples, made of these rods, during the diametric compression test was 14...40 MPa (similar values for pellets were 38...71 MPa). The density of rods' material equal to  $(5,40\pm 0,05)\times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ . Material has a porous structure. According to the XRD analysis there is no  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  phase in the sintered rod (but it was found in the initial powder). As a result of its interaction with the coolant the dysprosium borate  $\text{DyBO}_3$  forms. IR-spectrum of the samples shows an intense dysprosium hafnate band – 460  $\text{cm}^{-1}$ , a weak hafnium oxide band at 520  $\text{cm}^{-1}$ , characteristic bands, which indicate the presence of iron oxides impurities: 595 and 930  $\text{cm}^{-1}$ , which, probably, were present in the coolant, and a slight amount of adsorbed molecular water.

**KEY WORDS:** *dysprosium hafnate, corrosion resistance, phase analysis, WWER-1000 reactor, pellets, powder.*

## ВВЕДЕНИЕ

Надежность работы поглощающих элементов (ПЭЛ) поглощающих стержней системы управления и защиты (ПС СУЗ) водо-водяных реакторов типа ВВЭР определяются, в первую очередь, устойчивостью к воздействию теплоносителя и нейтронного облучения. В результате взаимодействия с теплоносителем может происходить изменение массы, объема, формы поглощающих материалов, их фрагментация. Как правило, комплексное влияние температуры и потока нейтронов существенно снижают коррозионную стойкость поглощающих материалов. Снижение коррозионной стойкости обусловлено изменением химического состава поглощающих материалов, особенно на их поверхности, которая непосредственно контактирует в случае разгерметизации ПЭЛ с теплоносителем, из-за накопления трансмутантов – продуктов ядерных реакций.

Простые оксиды редкоземельных элементов ( $\text{Ln}_2\text{O}_3$ ), которые имеют значительные сечения поглощения нейтронов, в своем большинстве являются не коррозионностойкими не только в водных теплоносителях высоких параметров ( $t = 280...300^\circ\text{C}$ ,  $P = 13...18 \text{ МПа}$ ), но и достаточно активно взаимодействуют с водяным паром, который находится в воздухе при комнатной температуре. Результатом такого взаимодействия является образование гидроксидов ( $\text{Ln}(\text{OH})_3$ ), которое сопровождается большими объемными изменениями (до 20...30%), разрыхлением и разрушением компактных изделий [1-3].

Например, один из наиболее эффективных поглотителей нейтронов оксид европия ( $\text{Eu}_2\text{O}_3$ ) в кипящей воде и паре при температуре  $350^\circ\text{C}$  превращается в кристаллический тригидроксид  $\text{Eu}(\text{OH})_3$  со структурой типа  $\text{UCl}_3$  и рентгеновской плотностью  $5,37\times 10^3 \text{ кг/м}^3$  меньшей почти на 30% от плотности  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  [1]. Вследствие увеличения объема при образовании  $\text{Eu}(\text{OH})_3$  происходит деградация и разрушение изделий из  $\text{Eu}_2\text{O}_3$ . Результаты коррозионных испытаний таблеток из  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  в воде при давлении 0,1 МПа и температуре  $100^\circ\text{C}$  показали, что уже после 72 ч происходит их превращение в  $\text{Eu}(\text{OH})_3$  [3].

Аналогичным образом и оксид диспрозия при взаимодействии с водой образует оксигидроксид  $\text{DyO}(\text{OH})$  и гидроксид  $\text{DyO}(\text{OH})_3$ . Реакция гидратации происходит в две стадии:  $\text{Dy}_2\text{O}_3 + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow 2\text{DyO}(\text{OH})$ ,  $\text{DyO}(\text{OH}) + \text{H}_2\text{O} \Rightarrow \text{DyO}(\text{OH})_3$ . Автоклавные испытания таблеток из  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  при давлении 0,1 МПа длительностью 100 ч как при температуре  $340^\circ\text{C}$ , так и при  $100^\circ\text{C}$  приводят к их полному разрушению [2].

Проблема низкой коррозионной стойкости оксидов редкоземельных элементов решается путем получения композиций в виде соединений, например, таких как титанаты и гафнаты. Поглощающие материалы на основе гафната диспрозия на сегодняшний день считаются наиболее перспективными для использования в органах регулирования энергетических ядерных реакторов [4-7]. Наличие в его составе двух поглощающих элементов Dy и Hf увеличивает физическую эффективность по сравнению с титанатом диспрозия, который используется в настоящее время в ПЭЛ в виде порошка. В системе  $\text{Dy}_2\text{O}_3\text{-HfO}_2$  в широкой области концентраций удается фиксировать кубический твердый раствор структуры типа флюорита, обладающий повышенной радиационной стойкостью и хорошей коррозионной стойкостью [4, 8].

Следует отметить, что результаты по реакторным испытаниям и послереакторным исследованиям образцов из гафната диспрозия в достаточной степени освещены в литературе. Данные по коррозионной стойкости и изучению кинетики коррозионных процессов на образцах из гафната диспрозия встречаются сравнительно редко.

Целью данной работы является исследование коррозионной стойкости гафната диспрозия в виде таблеток и порошка при длительных автоклавных испытаниях в воде состава первого контура реактора ВВЭР-1000.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование особенностей взаимодействия с водным теплоносителем гафната диспрозия проводили, используя его в форме таблеток и порошка. Для изготовления таблеток применяли наиболее простой и дешевый метод – твердофазный синтез из смеси мелкодисперсных порошков  $Dy_2O_3$  и  $HfO_2$ , освоенный в производстве, который включал формование таблеток, предварительное спекание, измельчение таблеток в порошок и финишное спекание [9, 10]. В качестве исходного материала использовали смесь порошков оксидов состава:  $Dy_2O_3$  – 36,1% масс.  $HfO_2$ . Операции спекания проводили в высокотемпературной печи типа VP 04/17 на атмосфере воздуха. Для исследований были приготовлены три серии таблеток, которые отличались режимами спекания, плотностью и фазовым составом (табл. 1).

**Таблица 1. Особенности изготовления и характеристики таблеток гафната диспрозия**  
**Table 1. Manufacturing features and characteristics of dysprosium hafnate pellets**

Номер серии	Температура предварительного спекания, °С	Режим финишного спекания		Плотность спекленных таблеток, $\times 10^3 \text{ kg/m}^3$	Общая пористость, %
		температура, °С	время, h		
1	1450	1650	3	8,20...8,30	3,7...4,9
2		1550	3	7,97...8,05	6,5...7,5
3	0	1650	3	7,24...7,39	14,0...16,0

Порошок получали путем измельчения таблеток серии 3, приготовленных с использованием схемы с одноразовым спеканием.

Коррозионные испытания выполняли в автоклавах, изготовленных из нержавеющей аустенитной стали марки X18H10T, по стандартной методике. Испытания таблеток гафната диспрозия ( $Dy_2O_3 \cdot HfO_2$ ) проводили как в открытом виде, так и в составе дефектных макетов ПЭЛ, которые включали оболочку из стали 06X18H10T диаметром 8,2×0,6 мм, длиной 50 мм, загерметизированную концевыми деталями (конусом и наконечником), изготовленными из стали 08X18H10T. Внутри оболочки размещены таблетки или порошок гафната диспрозия, зафиксированные от перемещения со стороны наконечника (верхней концевой детали) пробкой из никелевой сетки.

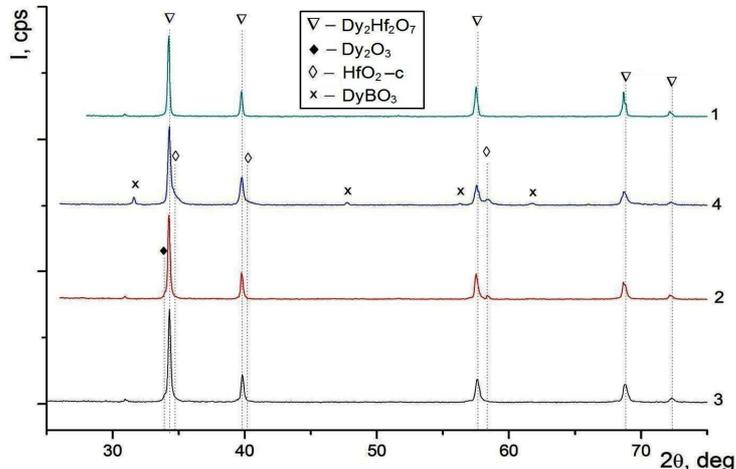
Между пробкой и наконечником предусмотрен зазор, имитирующий газосборник. В оболочках макетов выполнены сквозные дефекты  $\varnothing 1,0$  мм. В половине макетов отверстие выполнено против цилиндрической части посадочного места конуса (нижняя заглушка), таким образом, чтобы теплоноситель к таблеткам проникал через зазор между оболочкой и посадочным местом конуса, а в другой половине макетов отверстие выполнено в районе газосборника.

В процессе испытаний таблетки и дефектные макеты ПЭЛ выдерживались в воде состава, близкого к составу теплоносителя первого контура реактора ВВЭР-1000 (бидистиллированная вода с добавками:  $H_3BO_3$  – 3 г/дм<sup>3</sup>;  $NH_3$  – 3 мг/дм<sup>3</sup>;  $KOH$  – 12,3 мг/дм<sup>3</sup>, рН = 7,2) при температуре 350°С и давлении 16,5 МПа. Длительность испытаний составляла для макетов ПЭЛ 5200 ч, а для таблеток гафната диспрозия 7200 ч. Таблетки периодически после извлечения из автоклавов просушивали при 150°С в течение 5 ч для удаления влаги, после чего их взвешивали с точностью 0,05 мг. Привесы образцов после определенного времени выдержки в автоклаве определяли гравиметрическим способом. Относительная погрешность измерений составляла не более 5%. Механические испытания таблеток выполняли в соответствии с ГОСТ 25.503-80 на разрывной машине Р-10 при комнатной температуре. Фазовый состав образцов определяли методом рентгеновской дифракции на установке ДРОН-2.0 в кобальтовом  $Co-K\alpha$  излучении с применением Fe селективно поглощающего фильтра, а также методом инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрофотометре UR-20 (Цейс). Регистрацию спектров осуществляли в спек-

тральном диапазоне  $4000 \dots 400 \text{ см}^{-1}$ . Кристаллооптические исследования проводили на микроскопах ПОЛАМ-Л211 и МИН-8.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты рентгеноструктурного анализа материала таблеток и определения параметров решетки фаз, выполненные по методу Ритвельда, представлены на рис. 1.

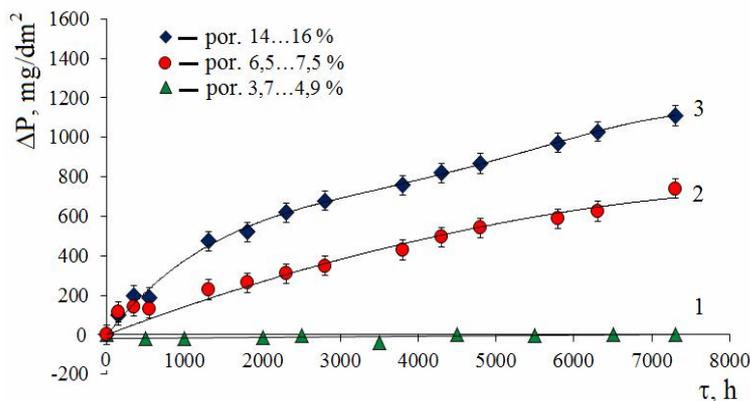


**Рис. 1.** Дифрактограммы материала исследуемых образцов: 1 – таблетки серии 1 (исход. сост.); 2 – таблетки серии 2 (исход. сост.); 3 – таблетки серии 3 (исход. сост.); 4 – спекшийся порошок в результате коррозионных испытаний.

**Fig. 1.** The powder XRD patterns of investigated samples: 1 – series 1 pellets (initial state); 2 – series 2 pellets (initial state); 3 – series 3 pellets (initial state); 4 – powder sintered after the corrosion tests.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что материал образцов серии 1 является однофазным и представляет гафнат диспрозия  $\text{Dy}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ -f (структурный тип флюорита) с параметром решетки  $a = 5,257 \pm 2 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ . В материале образцов серий 2 и 3 (табл. 1) основной фазой является  $\text{Dy}_2\text{Hf}_2\text{O}_7$ -f. Его содержание составляет 93...95% масс. Кроме того, в материале образцов выявлены оксид диспрозия  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  (3,5...4,3% масс., параметр решетки  $a = 10,606 \pm 3 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ ) и кубический оксид гафния  $\text{HfO}_2$  (1,8...2,1% масс., параметр решетки  $a = 5,189 \pm 3 \cdot 10^{-3} \text{ \AA}$ ). Причем, в этих образцах параметры решетки трех фаз отличаются от соответствующих литературных значений, что связано с взаимозамещением атомов диспрозия и гафния в узлах кристаллических решеток данных фаз. Результаты исследований с использованием ИК-спектроскопии подтверждают наличие в образцах серий 2 и 3 флюоритовой структуры гафната диспрозия, исходных оксидов гафния и диспрозия и молекулярной воды.

В результате автоклавных испытаний таблеток гафната диспрозия установлены зависимости скорости коррозии от величины общей пористости и, соответственно, от фазового состава. Вес образцов серии 1, общая пористость которых не превышает 5%, практически не меняется в процессе испытаний (максимальное уменьшение привеса составляет  $\leq 0,08 \text{ мг/дм}^2$  за первые 3500 ч испытаний) (рис. 2).

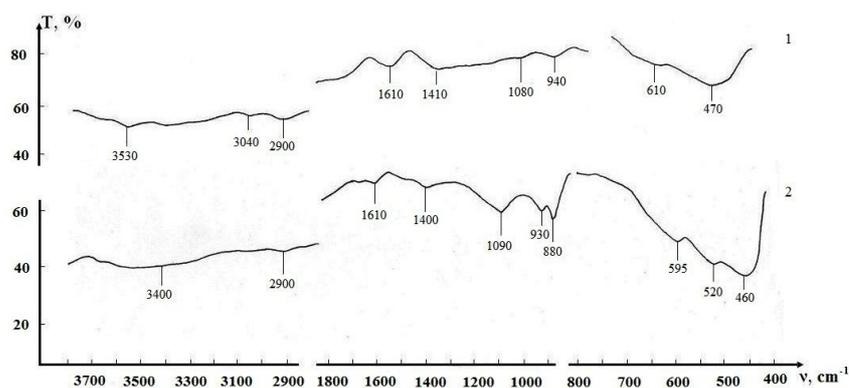


**Рис. 2.** Зависимость привесов ( $\Delta P$ ) таблеток гафната диспрозия от времени ( $\tau$ ) коррозионных испытаний в водном теплоносителе при температуре  $350^\circ\text{C}$  и давлении 16,5 МПа, имеющих разную пористость: 1 – 3,7...4,9%; 2 – 6,5...7,5%; 3 – 14...16%.

**Fig. 2.** Dependence of dysprosium hafnate overweight ( $\Delta P$ ) on time of corrosion tests in water coolant at  $350^\circ\text{C}$  and pressure 16.5 MPa, which have different porosity: 1 – 3,7...4,9%; 2 – 6,5...7,5%; 3 – 14...16%.

Вероятно, это обусловлено отсутствием открытой пористости, которая согласно данным работы [11], при плотности таблеток  $>96\%$  теоретической, не превышает 0,5%. Процесс коррозии образцов серий 2 и 3, пористость которых равняется соответственно 6,5...7,5% и 14...16% и в составе которых присутствуют в незначительном количестве  $\text{Dy}_2\text{O}_3$  и  $\text{HfO}_2$ , можно условно разделить на две стадии: начальную и установившуюся. На начальной стадии при длительности

испытаний до ~1300 ч процесс коррозии происходит более интенсивно, чем на установившейся. Средние скорости коррозии образцов этих двух серий на начальной стадии составляют 18,5 мг/м<sup>2</sup>·ч и 36,2 мг/м<sup>2</sup>·ч, а на установившейся уменьшаются до 8,3 мг/м<sup>2</sup>·ч и 11,3 мг/м<sup>2</sup>·ч. Таковую особенность коррозии можно объяснить тем, что на начальной стадии интенсивно идет процесс заполнения открытых пор теплоносителем и его взаимодействие с материалом таблеток с образованием гидроксидов гафната диспрозия. Изменение привесов образцов в результате процесса гидратации подтверждено результатами исследований методом ИК-спектроскопии, при помощи которого зафиксированы полосы валентных и деформационных колебаний гидроксильных групп ОН: 3530 и 1610 см<sup>-1</sup> в образцах после коррозионных испытаний (рис. 3, график 1).

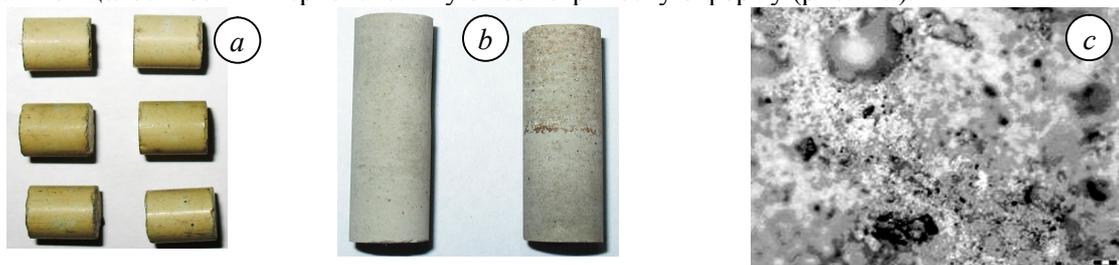


**Рис. 3.** ИК-спектры поглощения образцов гафната диспрозия: 1 – материал таблеток серии 1; 2 – материал стержня, спекшегося из порошка после коррозионных испытаний дефектных макетов ПЭЛ.

**Fig. 3.** IR-spectroscopy of dysprosium hafnate samples: 1 – series 1 pellet; 2 – powder sintered after the corrosion tests of faulty mock-ups.

Полученные результаты согласуются с данными работы [3], где подтверждается зависимость скорости коррозии при температуре теплоносителя 350°C от соотношения оксидов гафния и диспрозия в гафнате диспрозия и от плотности таблеток. Авторы работы фиксировали как увеличение, так и уменьшение веса образцов в зависимости от состава и плотности в процессе испытаний. Согласно приведенным данным значения скорости коррозии образцов находятся в интервале значений 3,1...9,0 мг/м<sup>2</sup>·ч.

Результаты испытаний дефектных макетов ПЭЛ с таблетками гафната диспрозия при температуре 350°C, давлении 16,5 МПа длительностью 5200 ч свидетельствуют об их высокой работоспособности. Геометрические размеры ПЭЛ в пределах ошибки измерений не меняются. На поверхности макетов образовывается тонкая оксидная пленка характерного для данных материалов цвета: светло-коричневая на оболочке и светло-серая на поверхности концевых деталей и сварных соединений. Таблетки гафната диспрозия после извлечения из макетов ПЭЛ сохраняют целостность и первоначальную геометрическую форму (рис. 4 а).



**Рис. 4.** Внешний вид поглощающих материалов после испытаний в составе дефектных макетов ПЭЛ при температуре 350°C, давлении 16,5 МПа длительностью 5200 ч: а – таблетки гафната диспрозия; б – стержни гафната диспрозия, спекшиеся из порошка; с – микроструктура материала стержня.

**Fig. 4.** Appearance of the absorbing material after the test as part of the absorber elements faulty mock-ups at 350°C and a pressure of 16,5 MPa duration of 5200 h: а – dysprosium hafnate pellets; б – dysprosium hafnate rods, sintered from powder; с – the microstructure of the rod's material.

Практически на всех таблетках обнаружено незначительное уменьшение веса по сравнению с исходным состоянием, что в пересчете на скорость коррозии составляет 1,6...7,0 мг/м<sup>2</sup>·ч. Заметного изменения фазового состава материала таблеток после коррозионных испытаний, по сравнению с исходным состоянием, методом рентгеноструктурного анализа не выявлено.

Порошок гафната диспрозия в результате автоклавных испытаний спекается в стержень (рис. 4 б). Его диаметр равняется 7,01...7,03 мм, то есть внутреннему диаметру оболочек. Вес сердечников по сравнению с исходным порошком гафната диспрозия увеличивается в среднем на ~3%. Отжиг в вакуумном шкафу при температуре 150°C длительностью два часа не приводит к изменению веса стержней, что свидетельствует об отсутствии влаги в несвязанном виде. Стержни являются относительно прочными. Прочность образцов, изготовленных из стержней, на диаметрально сжатие равняется 14...40 МПа (аналогичные значения спеченных таблеток составляют 38...71 МПа). Плотность материала стержней равняется  $(5,40 \pm 0,05) \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Материал имеет пористую структуру (рис. 4 с).

Согласно данным рентгеноструктурного анализа в материале спекшегося стержня отсутствует Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, обнаруженный в исходном порошке. В результате его взаимодействия с теплоносителем наблюдается образование бората диспрозия DyBO<sub>3</sub> (рис. 1, график 4). В ИК спектре данного образца (рис. 3, график 2) присутствует интенсивная полоса гафната диспрозия – 460 см<sup>-1</sup>, слабая полоса в области 520 см<sup>-1</sup>, соответствующая оксиду гафния, а также ряд полос средней интенсивности, характерных для колебаний в структуре соединений железа: 880, 1090, 1400 и 2920 см<sup>-1</sup>. Также образцы содержат незначительное количество адсорбированной молекулярной воды, в связи с чем в спектре проявляются слабые размытые полосы в области валентных и деформационных колебаний: О-Н: 3400 и 1610 см<sup>-1</sup> (рис. 3, график 2).

## ВЫВОДЫ

Получены зависимости привесов таблеток гафната диспрозия от времени при испытаниях в воде состава теплоносителя реактора ВВЭР-1000 при температуре 350°C и давлении 16,5 МПа. Показано, что высокоплотные образцы, пористость которых <5%, практически не изменяют свой вес при коррозионных испытаниях в течение 7200 ч. Скорости коррозии таблеток, имеющих общую пористость 6,5...7,5% и 14...16%, на установившейся стадии составляют 8,3 мг/м<sup>2</sup>·ч и 11,3 мг/м<sup>2</sup>·ч. Рассмотрен вероятный механизм коррозии таблеток гафната диспрозия при автоклавных испытаниях в водном теплоносителе. Установлено, что после автоклавных испытаний порошка гафната диспрозия, содержащего непрореагировавшие оксиды Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и HfO<sub>2</sub>, в составе дефектных макетов ПЭЛ при 350°C в течение 5200 ч он спекается в стержни плотностью  $(5,40 \pm 0,05) \times 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, прочность которых при испытаниях на диаметрально сжатие равняется 14...40 МПа. Подтверждена высокая живучесть дефектных макетов ПЭЛ с таблетками и порошком гафната диспрозия коррозионными испытаниями при температуре 350°C в водном теплоносителе состава реактора ВВЭР-1000.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Бацинов С.С., Дерibas А.А., Кустов Г.Н. Взаимодействие оксидов редкоземельных элементов с водой // Журнал неорганической химии. – 1967. – Т. 12, № 9. – С. 2283-2286.
2. Рисованый В.Д., Клочков Е.П., Захаров А.В., Светухин В.В. Поглощающие материалы для атомных реакторов: Учебно-методический комплекс. – Ульяновск: УлГУ. – 2006. – 113 с.
3. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Пономаренко В.Б., Клочков Е.П., Муралева Е.М. Диспрозий в ядерной технике <sup>16</sup>Dy<sub>66</sub>. Димитровград: ОАО «ГНЦ НИИАР». – 2011. – 224 с.
4. Risovany V.D., Zakharov A.V., Muraleva E.M., Kosenkov V.M., Latupov R.N. Dysprosium hafnate as absorber material for control rods // Journal of Nuclear Materials. – 2006. – 355. – P. 163-170.
5. Рисованый В.Д., Захаров А.В., Муралева Е.М. Новые перспективные поглощающие материалы для ядерных реакторов на тепловых нейтронах // Вопросы атомной науки и техники. Серия: «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение». – 2005. – № 3 (86). – С. 87-93.
6. Белаш Н.Н., Куштым А.В., Татаринцев В.Р., Чернов И.А. Анализ разработок конструкций и материалов ПЭЛ ПС СУЗ повышенной работоспособности // Ядерные и радиационные технологии. – 2007. – Т. 7 (№ 3-4). – С. 18-28.
7. Неворотин В.К., Петрунин В.Ф., Попов В.В. Поглощающий нейтроны материал на основе гафната диспрозия. Патент RU 2522747. Бюл. № 22 от 20.07.2012.
8. Перова Е.Б., Спиридонов Л.Н., Комисарова Л.Н. Фазовые равновесия в системе HfO<sub>2</sub>-Dy<sub>2</sub>O<sub>3</sub> // Известия Академии наук СССР. Неорганические материалы. – 1972. – Т. 8, № 10. – С. 1878.
9. Захаров А.В., Рисованый В.Д., Муралева Е.М., Соколов В.Ф. Разработка и освоение производства гафната диспрозия как поглощающего материала для органов регулирования перспективных реакторов на тепловых нейтронах // Сборник трудов ГНЦ НИИАР. – 2011. – вып. 2. – С. 8-13.
10. Красноруцкий В.С., Белаш Н.Н., Чернов И.А., Валежный Е.Б., Саенко С.Ю., Белкин Ф.В., Сурков А.Е., Пилипенко А.В., Богатыренко С.И. Исследование влияния способов изготовления и легирования на свойства таблеток гафната диспрозия // ВАНТ, серия: физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение. – 2012. – № 5 (81). – С. 62-68.
11. Sang Ho Na, Si Hyung Kim, and Young-Woo Lee. Relation Between Density and Porosity in Sintered UO<sub>2</sub> Pellets // Journal of the Korean Nuclear Society. – 2002. – V. 34, N 5. – P. 433-435.